

# 150-MeV マイクロトロンにおけるレーザー・コンプトン散乱ガンマ線の発生 GENERATION OF LASER COMPTON SCATTERED GAMMA-RAYS FROM A 150-MEV MICROTROTRON

羽島良一<sup>#,A)</sup>, 早川岳人<sup>A)</sup>, 静間俊行<sup>A)</sup>, C.T. Angell<sup>A)</sup>, 神門正城<sup>B)</sup>, 大東出<sup>C)</sup>, 大垣英明<sup>C)</sup>  
Ryoichi Hajima<sup>#,A)</sup>, Takehito Hayakawa<sup>A)</sup>, Toshiyuki Shizuma<sup>A)</sup>, Cristopher T. Angell<sup>A)</sup>, Masaki Kando<sup>B)</sup>,  
Izuru Daito<sup>C)</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Quantum Beam Science Directorate, JAEA (Tokai)

<sup>B)</sup> Quantum Beam Science Directorate, JAEA (Kansai)

<sup>C)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

## Abstract

We have developed a laser Compton scattered gamma-ray source based on a 150-MeV racetrack microtron at Japan Atomic Energy Agency. The microtron equipped with a photocathode RF gun accelerates a single bunch of electrons to collide with a laser pulse from a Nd:YAG laser. We have employed laser pulse compression by stimulated Brillouin scattering to obtain high-flux gamma-rays,  $> 10^5$  ph/s. The gamma-ray source is a prototype of commercial machine for nuclear security applications, non-destructive detection of nuclear material hidden in a ship cargo. Design and performance of the gamma-ray source are presented.

## 1. はじめに

2010 年以来、国際核セキュリティサミットが隔年で開催されるようになるなど、国際的に核テロの脅威が高まっている中、国境をまたいだ核物質の移動を防ぐための技術が求められている。とりわけ、米国向けの貨物については、米国が定める法律に従って、全コンテナの輸出前の検査が必要とされている（ただし、実用的な検査技術が確立するまでは、法の執行は猶予されている）。

貨物に隠ぺいされた核物質の検知は、核物質が放出する放射線を外部から検知する方法（パッシブ法）、外部線源からの放射線を貨物に照射して隠ぺいされた核物質の反応を調べる方法（アクティブ法）に大別される。また、測定する放射線の種類によって、ガンマ線法、中性子法がある。

Co-60 のような放射性物質は、ダーティボムの原料となるが、このようなガンマ線放出核種は、一般的な放射線検出器を用いて貨物を開封せずに検知が可能である（パッシブ、ガンマ線法）。しかしながら、U-235 のように核爆弾の原料となるものでありながらガンマ線や中性子を放出しない核種については、アクティブ法による検知システムが必要となる。

われわれは、港湾等に設置し貨物コンテナ中の核物質検知を目的として、外部線源として中性子とガンマ線を用いたシステムを提案し、この実現に必要な技術開発を進めている。本システムの概要を Fig. 1 に示す[1]。牽引車に積載された貨物コンテナは、まず、D-D 中性子源を用いた前置スクリーニング装置に導かれる。ここでは、遅延中性子を入射した時の核物質からの反応を、遅延中性子、中性子

雑音として検出する。核物質の隠ぺいが疑われるコンテナは、後段のガンマ線システムに導かれ、核物質の有無を詳細に検査される。

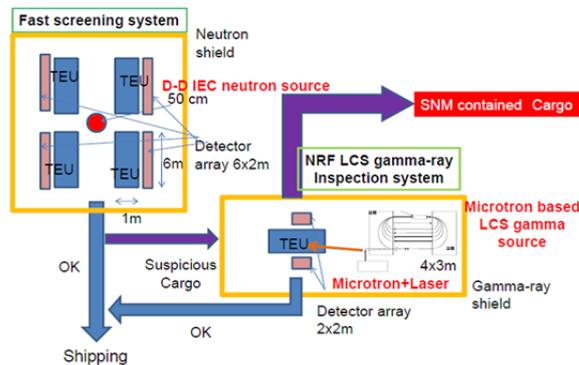


Figure 1: Conceptual design of the inspection system for nuclear material.

ガンマ線による核物質の検知は、原子核共鳴蛍光散乱 (Nuclear Resonance Fluorescence; NRF) の原理に基づいており、測定すべき同位体 (核物質) に固有の励起準位に同調したエネルギーのガンマ線を外部から入射し、共鳴散乱ガンマ線を測定することで検知を行う。入射ガンマ線は、レーザーと高エネルギー電子の衝突散乱である、レーザー・コンプトン散乱 (Laser Compton Scattering; LCS) によって発生させる[2]。

本システムのガンマ線源は、運転が容易で小型の必要があるため、電子加速器としてマイクロトロンを採用することとし、JAEA 関西光科学研究所 (JAEA-KPSI) に設置されている 150-MeV マイクロトロン (Fig.2) を用いて、ガンマ線源の研究開発と核

<sup>#</sup> hajima.ryoichi@jaea.go.jp

物質検知の実証実験を進めている。

150-MeV マイクロトロンにて発生可能なガンマ線エネルギーは、レーザー波長  $1\ \mu\text{m}$  で約 400 keV であり、レーザーの二次高調波を用いても約 800 keV にとどまる。実用機における U-235 の共鳴エネルギー 1.733 MeV の発生には、220 MeV 以上の電子エネルギーが必要である。しかしながら、ガンマ線発生部 (LCS) の設計、レーザーと加速器の運転は、実用機と 150-MeV マイクロトロンは共通であり、JAEA-KPSI における実験で、実用機の設計製作に必要な知見は得られると考えている。なお、220-MeV マイクロトロンの設計は別途行っている[3]。

## 2. 150-MeV マイクロトロンにおける LCS 実験

### 2.1 150-MeV レーストラック・マイクロトロン

LCS ガンマ線発生実験は、JAEA-KPSI に設置されている 150-MeV レーストラック・マイクロトロンを用いて実施している。本装置は、住友重機械工業の製品である。一般的なマイクロトロンが熱電子銃を備えマルチバンチで運転されるのに対して、本装置は、光陰極 RF 電子銃を備えており、シングルバンチ用に設計されている。主な運転パラメータは、バンチ電荷 60 pC、バンチ長 10 ps (rms)、規格化エミッタンス  $35\ \pi\ \text{mm-mrad}$ 、繰り返し 10Hz などである[4]。

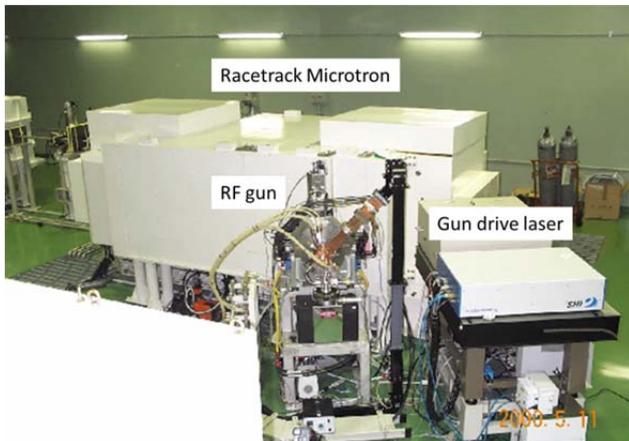


Figure 2: The 150-MeV racetrack microtron.

### 2.2 LCS 用レーザーシステム

LCS によるガンマ線発生用のレーザーシステムについても、加速器と同様に、運転調整が容易であり、堅牢な設計であることが望まれる。われわれは、市販の Nd:YAG レーザー (Continuum 社製、Power Light 9010) をベースとし、誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering; SBS) によるパルス圧縮装置を組み合わせたシステムを採用した。

ガンマ線発生部の模式図を Fig.3 に示す。電子とレーザーは  $1.5$  度の角度で、ほぼ正面から衝突する。Nd:YAG レーザーのパルス長は 8 ns であり、電子バンチと効率的な衝突散乱を行うには、パルスが長ず

る[5]。このため、SBS によるパルス圧縮が必要となる。

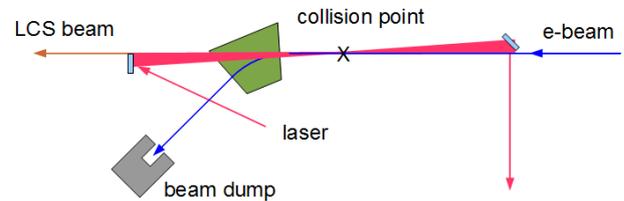


Figure 3: Layout of laser Compton scattering.

SBS は、レーザーを媒質に入射した時に媒質に励起される音響振動 (フォノン) によってレーザーが散乱される現象であり、後方散乱されたレーザーのパルス長は、媒質中のフォノンの寿命に依存するため、適切な媒質を選ぶことで、レーザーパルスを圧縮することが可能になる。本実験では、フロリナート (3M, FC-40) を使用し、8 ns の入射レーザーパルスが 200 ps に圧縮できるように設計した (Fig.4) [6]。

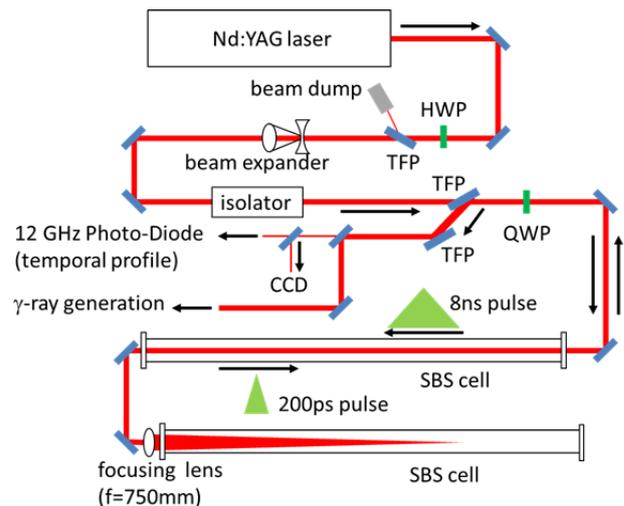


Figure 4: The laser system for  $\gamma$ -ray generation

### 2.3 ガンマ線測定システム

核物質検知の実用機において U-235 の検知を行う場合、ガンマ線源のエネルギー、フラックスは、1.733 MeV、 $3 \times 10^5\ \text{ph/s}$  を設計値としている。150-MeV マイクロトロンにおける実験では、ガンマ線エネルギーは 400 keV であり、フラックス  $1 \times 10^5\ \text{ph/s}$  を目標とした。実験では、ガンマ線フラックスを二種類の測定手法で確認した。LCS ガンマ線を直接測定する方法 (直接法)、ビーム軸上に設置された Al 板からの散乱ガンマ線の測定 (散乱法) である。

直接法では、ビーム軸  $0$  度方向に設置した LYSO シンチレータ ( $20 \times 20\ \text{mm}^2$ 、厚さ 5 mm) を用いてガンマ線フラックスの測定を行った。LYSO シンチレータは、結晶と光電子増倍管 (PMT) との間に Neutral Density (ND) フィルターを挿入することに

よりシンチレーション光を減光し、ショットあたりのガンマ線によるエネルギー損失が最大 3.7 GeV まで測定できるよう調整した。

一方、散乱法では、ビーム軸上に設置した Al 板 (厚さ 3 mm, 回転角 45 度) からの散乱ガンマ線を、GSO 検出器 (20×20×50 mm, 設置角は 90 度と 135 度) で測定した。測定されたガンマ線収量を、Al 板の厚さ、立体角、および GSO 結晶サイズ等をもとにモンテカルロシミュレーション (EGS5) により見積もった検出確率で除することにより、発生ガンマ線フラックスを導出した。

### 2.4 ガンマ発生実験結果

実験では、まず、二種類の測定法によるガンマ線フラックスの比較を行い、測定の妥当性を確認した。レーザーパルスエネルギー 178 mJ の時、3000 ショットの平均を行い発生ガンマ線フラックスを求めたところ、直接法で  $(6.3 \pm 1.5) \times 10^3$  ph/shot、散乱法で  $(5.58 \pm 0.24) \times 10^3$  ph/shot となった。二種類の測定結果が統計誤差の範囲で一致していることから、測定は妥当であると判断した。Fig.5 は、直接法により得られたガンマ線エネルギーのヒストグラムである [7]。

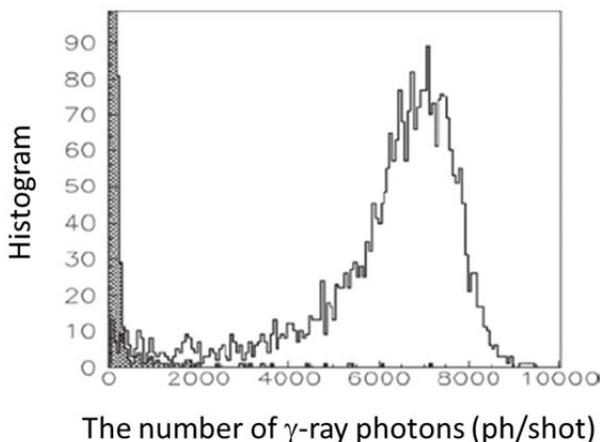


Figure 5: Histogram of  $\gamma$ -ray photon statistics obtained from the direct method. The number of photons per shot is  $(6.3 \pm 1.5) \times 10^3$  ph/shot. The hatching area is a histogram without the laser pulse injection as a background signal.

次に、レーザーパルスエネルギーを変えながら、ガンマ線フラックスの測定を行った。ガンマ線フラックスは、レーザーパルスエネルギーにほぼ比例することを確認し、レーザーパルスエネルギー 700 mJ に対して発生ガンマ線フラックス  $1.2 \times 10^4$  ph/shot を得た。10 Hz の運転では  $1.2 \times 10^5$  ph/s となり、ガンマ線フラックスの目標値を達成した。

### 3. 今後の予定

LCS ガンマ線の発生を実証できたので、次の段階として、模擬物質の検知実験を予定している。400 keV 近傍に共鳴エネルギーを持つ核種として、

例えば、Ag-107(325 keV)、Ag-109(311 keV)がある。このような核種からなる試料にガンマ線を照射し、散乱ガンマ線を測定することで、特定の核種 (同位体) の非破壊検知の実証実験を行う。ここでは、ガンマ線検出器として、京都大学が開発したシンチレータアレイ、LaBr<sub>3</sub>(Ce)を用いる予定である [8]。この検出器は、産業利用に必要な堅牢性と信頼性を備えたものである。

また、新たに出力の大きな Nd:YAG レーザーの導入を進めている。3 J のレーザーパルスを発生する装置であり、ガンマ線発生量のさらなる増大が見込まれる。

港湾等に設置する実用機のための 220 MeV のレーストラック・マイクロトロン設計についても、住友重機械工業の協力を得て進めている [3]。

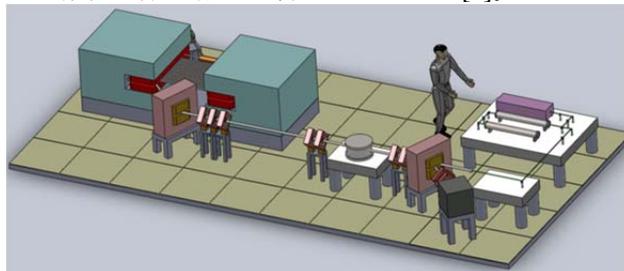


Figure 6: Conceptual design of a 1.7-MeV  $\gamma$ -ray source based on a 220-MeV racetrack microtron and a frequency-doubled Nd:YAG laser

### 4. まとめ

港湾等に設置し貨物コンテナ中に隠ぺいされた核物質を非破壊で検知するシステムの実用化を目指して、マイクロトロン電子加速器と Nd:YAG レーザーを用いたレーザー・コンプトン散乱ガンマ線源の開発を進めている。電子とレーザーの衝突点の最適化、SBS によるレーザーパルス圧縮技術を完成し、 $1.2 \times 10^4$  ph/shot のガンマ線発生に成功した。10 Hz の運転時に  $1.2 \times 10^5$  ph/s が得られる値である。今後は、レーザー装置のアップグレード、模擬物質の非破壊検知実験などを予定しており、実用機の製作に必要な技術とノウハウの獲得を目指している。

本研究は、社会システム改革と研究開発の一体的推進 (文部科学省補助金事業)、安全安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム「ガンマ線による核物質非破壊検知システム」の支援による行われている。

### 参考文献

- [1] H. Ohgaki et al., Proc. 2010 IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security, 525 (2010).
- [2] R. Hajima et al., J. Nucl. Sci. Tech. 45, 441 (2008).
- [3] T. Hori et al., Proc. Part. Acc. Soc. Jpn (2013) (in Japanese)
- [4] M. Kando et al., Proc. PAC-1999, 3702 (1999).
- [5] R. Hajima et al., Proc. IPAC-2011, 3663 (2011).
- [6] I. Daito et al., Proc. IPAC-2012, 4124 (2012)
- [7] I. Daito et al., J. Plasma Fusion Res., 88, 553 (2012) (in Japanese).
- [8] M. Omer et al., Proc. IEEE-NSS-2011, 1627 (2011).